

## ДОСЛІДЖЕННЯ НОВОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

І.Я.Дарвай

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42002,  
e-mail: [idarvaj@mail.ru](mailto:idarvaj@mail.ru)

*В статті висвітлено теоретичне обґрунтування нового методу визначення теплоти згоряння природного газу, який полягає у комплексному вимірюванні таких параметрів, як швидкість поширення звуку в газі, вмісту діоксиду вуглецю та азоту. Розроблений метод перевірено за допомогою штучної нейронної мережі на довідкових значеннях параметрів природного газу та змодельовано за допомогою штучної нейронної мережі на реальних значеннях параметрів газу. Результати моделювання підтвердили спроможність реалізації методу.*

Ключові слова: теплота згоряння, вміст діоксиду вуглецю, швидкість поширення ультразвуку в газі

*В статье рассмотрено теоретическое обоснование нового метода определения теплоты сгорания природного газа, который состоит в комплексном измерении таких параметров, как скорость распространения звука в газе, содержания диоксида углерода и азота. Разработанный метод проверено с помощью искусственной нейронной сети на справочных значениях параметров природного газа и смоделировано с помощью искусственной нейронной сети на реальных значениях параметров газа. Результаты моделирования подтвердили осуществимость реализации метода.*

Ключевые слова: теплота сгорания, содержание диоксида углерода, скорость распространения ультразвука в газе

*In this article is considered theoretical proof of new method for determining of heating value, which is based on measuring such parameters as sound speed in gas, carbon dioxide and nitrogen content. New method is proved using artificial neural network on referenced data and modeled by artificial neural network on real data of natural gas parameters. Results of modeling confirmed possibility of the newly developed method implementation.*

Keywords: calorific value, carbon dioxide content, ultrasound speed in natural gas

Завдяки географічному розташуванню та історичним особливостям Україна відіграє особливу роль на Європейському та світовому енергетичному ринку. Україна – енергозалежна держава, оскільки власними первинними енергетичними ресурсами забезпечена недостатньо [1]. Тому актуальним питанням для нашої держави є економія природного газу, що нерозривно пов'язано не лише з його кількістю, а й якістю.

На якість природного газу як основного енергоресурсу нашої держави впливає багато чинників, серед яких вміст вуглеводнів, інертних газів, вологі тощо. Основним показником якості природного газу можна назвати теплоту згоряння, оскільки вона визначає його енергетичну цінність, а транзит обсягів газу, що проходять через кордон України (за умовами договору) здійснюється з урахуванням його калорійності.

Теплоту згоряння природного газу в нашій державі визначають двома методами: розрахунковим методом (компонентний склад природного газу визначений хроматографічно) та експериментальним методом (визначення теплоти згоряння водяним калориметром) [2-4]. У роботі [5] проаналізовано переваги та недоліки кожного з методів, вказано на необхідність розроблення нового експрес-методу визначення теплоти згоряння природного газу, який одночасно давав би змогу вимірювати цей показник без визначення повного компонентного складу газу, був порівняно недорогим, точним та давав

можливість проводити вимірювання в режимі реального часу.

Важливим питанням також є система розрахунку за спожитий газ. Якщо практично в усіх країнах світу постачальник зі споживачем природного газу здійснює технічний розрахунок енергоемкості  $E$  (обчислюється як добуток об'єму газу  $V$  та нижчої теплоти згоряння  $Q_H$ ), тобто проводить коригування вартості природного газу залежно від його якості, то в Україні розрахунок споживачів за природний газ здійснюється за обсягами переданого газу без урахування його теплоти згоряння.

Метою даної роботи є теоретичне обґрунтування нового методу визначення теплоти згоряння природного газу за допомогою одержаних із сертифікатів якості на природний газ реальних параметрів.

У результаті виконаних теоретичних досліджень було запропоновано новий метод визначення теплоти згоряння газу, що полягає в нелінійній багатопараметровій апроксимації теплоти згоряння як функції від швидкості поширення звуку в газі, вмісту азоту та діоксиду вуглецю [5]. З метою вибору параметрів для визначення теплоти згоряння було проведено кореляційний аналіз низки стандартизованих фізико-хімічних показників газу – компонентного складу газу (вмісту горючих компонентів – вуглеводнів та вмісту негорючих компонентів – діоксиду вуглецю, азоту), швидкості поширення звуку в газі, густини, молярної маси тощо [6].

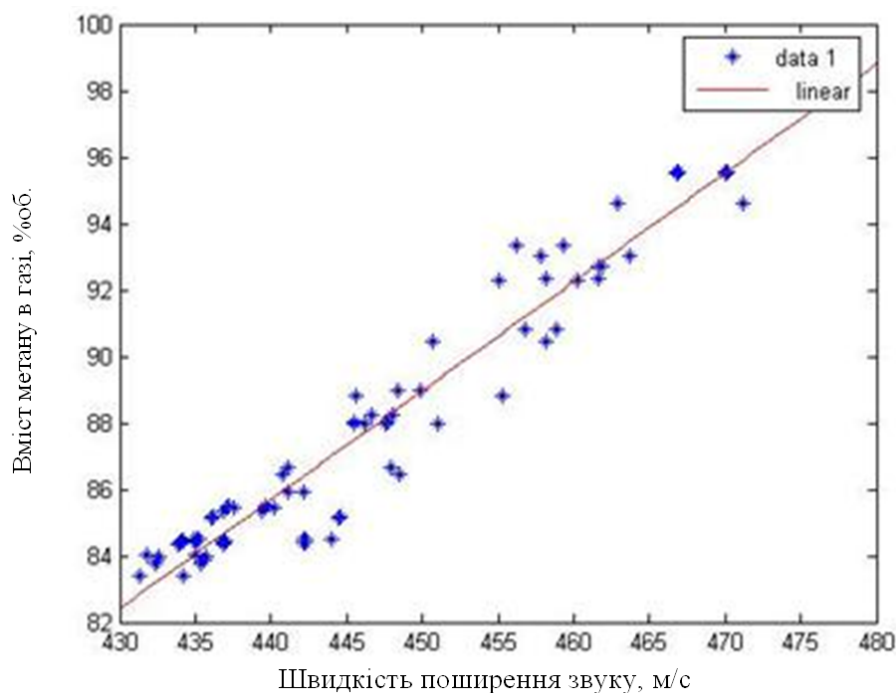


Рисунок 1 – Залежність вмісту метану від швидкості поширення звуку в природному газі

Результати кореляційного аналізу показали, що найвище значення мали коефіцієнти кореляції між швидкістю ультразвуку та вуглеводневим вмістом газу та його густиною. Коефіцієнти кореляції в цьому випадку становили: швидкість ультразвуку-метан  $K=0,97$ ; швидкість звуку-етан  $K=0,9$ ; швидкість звуку-пропан  $K=0,8$ ; швидкість звуку-бутан  $K=0,86$ ; швидкість звуку-густина  $K=0,99$ . На рисунку 1 зображено залежність швидкості поширення звуку в газі від вмісту метану, який є основним компонентом природного газу; вміст його в газі перебуває в межах від 85% об. до 95% об.

Коефіцієнти кореляції між теплою згоряння та вуглеводнями становлять: для метану  $K=-0,58$ ; для етану  $K=0,86$ ; для пропану  $K=0,92$ . Оскільки ці значення коефіцієнтів є дещо нижчими порівняно зі швидкістю поширення звуку, то теплоту згоряння доцільніше визначати через цей параметр. Визначати густина не доцільно, оскільки між нею та швидкістю поширення звуку існує фізичний зв'язок, описаний нижче. Але при цьому слід врахувати також вміст діоксиду вуглецю та азоту у природному газі, які, як показали результати кореляційного аналізу, також здійснюють вплив на значення теплоти згоряння. Коефіцієнти кореляції між теплою згоряння та азотом і діоксидом вуглецю були однаковими ( $K=-0,37$ ). Діоксид вуглецю та азот не виділяють тепла під час спалювання але можуть сприяти неповному згорянню інших компонентів природного газу [6].

Отже, описані вище результати кореляційного аналізу вказали на те, що теплота згоряння газу є функцією комплексу таких параметрів як швидкість поширення звуку в газі, вміст азоту та діоксиду вуглецю. Тому для визначення цієї характеристики за значеннями згаданих вище параметрів необхідно було розв'язати задачу

нелінійної апроксимації функції кількох параметрів. Для цього можна застосувати алгоритм штучних нейронних мереж (ШНМ) [7].

Для перевіряння запропонованого методу було проведено моделювання процесу визначення теплоти згоряння природного газу за допомогою алгоритму ШНМ. Як тренувальний обрано алгоритм зворотного поширення помилки Левенберга-Марквардта, який рекомендується для випадків, коли мережа та кількість навчальних пар у множині є невеликими.

Під час застосування ШНМ було використано базу довідкових даних, що складалася з 95 зразків сумішей природного газу [8]. Ця база є модифікованою множиною сумішей природного газу, значення показників якої одержано хроматографічним методом. Вихідним параметром для ШНМ була теплота згоряння природного газу, а вхідними параметрами – швидкість поширення ультразвуку в газі, вміст азоту та вміст діоксиду вуглецю. Для створення ШНМ базу даних розділено на 3 частини: для тренування обрано 78 варіацій якісних показників газу, для тестування – 8 (які не входили до 78), для моделювання – 9 (які не входили до жодного з попередніх наборів).

Теплота згоряння природного газу, що одержана в результаті моделювання роботи ШНМ, відповідає фактичним значенням теплоти згоряння газу, отриманим хроматографічним методом. Зведена до діапазону похибка визначення теплоти згоряння за допомогою довідкових даних складала 2,4%.

Для дослідження запропонованого методу на реальних даних використано 8 сертифікатів якості природного газу, одержаних на одному з підприємств Івано-Франківської області. У таблиці 1 наведено основні показники сертифіка-

Таблиця 1 – Основні показники природного газу із сертифікатів якості

Сертифікат	1	2	3	4	5	6	7	8
Вміст діоксиду вуглецю, %об.	0,017	0,057	0,627	0,072	0,042	0,064	0,063	0,062
Вміст азоту, %об.	3,514	0,512	0,702	1,661	0,666	0,759	0,759	0,762
Густина газу, кг/м <sup>3</sup>	0,6878	0,6731	0,7363	0,6815	0,6737	0,6833	0,6830	0,6826

Таблиця 2 – Розраховані значення швидкості ультразвуку в газі

Сертифікат	1	2	3	4	5	6	7	8
Швидкість поширення звуку в природному газі, м/с	438,5261	442,8236	421,3084	440,1655	442,6557	439,2279	439,3349	439,4786

Таблиця 3 – Порівняння фактичних значень теплоти згоряння газу з одержаними за допомогою ШНМ

Сертифікат	1	2	3	4	5	6	7	8
Теплота згоряння газу вища із сертифікатів якості, ккал/м <sup>3</sup>	8540,0	8830,0	9390,0	8760,0	8820,0	8910,0	8910,0	8900,0
Теплота згоряння, отримана за допомогою ШНМ, ккал/м <sup>3</sup>	8592,1	8812,3	9393,4	8708,6	8797,5	8923,7	8919,5	8913,2

тів, значення параметрів газу в яких одержано хроматографічним методом.

Швидкість звуку в природному газі в Україні не регламентується вимогами нормативних документів, тому для його обчислення використано ГОСТ 30319.1 та ГОСТ 30319.2 [9, 10]. Розрахунки проведено з використанням програми MATLAB 7.0.

Швидкість звуку залежить від параметрів стану газу (температури та тиску), а оскільки у нашому випадку природний газ це суміш, то ще й від складу. Згідно з ГОСТ 30319.1-96 швидкість звуку визначають за формулою:

$$u=18,591 \cdot (T \cdot k \cdot K / \rho_c)^{1/2}, \quad (1)$$

де:  $k$  – показник адіабати;

$K$  – коефіцієнт стискуваності;

$\rho_c$  – густина природного газу за стандартних умов;

$T$  – температура природного газу.

Показник адіабати природного газу розраховано за формулою Кобза [9].

Для розрахунку коефіцієнта стискуваності було використано модифіковане рівняння стану GERG-91, в якому враховують такі параметри, як густина газу, температура, тиск, а також вміст діоксиду вуглецю та азоту [10].

Розраховані значення швидкості ультразвуку природного газу за формулою (1) наведено в таблиці 2.

На вхід ШНМ, що використовувалася для перевіряння результатів кореляційного аналізу

та була натренована на значеннях з довідкової бази даних [5], було подано розраховану швидкість звуку за даними із сертифікатів якості на газ, вміст діоксиду вуглецю та азоту (також із сертифікатів якості на природний газ). На виході ШНМ було значення вищої теплоти згоряння газу. Результати моделювання за допомогою ШНМ наведено в таблиці 3.

Як бачимо на таблиці 3, значення фактичної теплоти згоряння природного газу відповідають значенням, одержаними за допомогою ШНМ. Коефіцієнт кореляції становить 0,9916, а зведена до діапазону похибка складає 1,5%.

Отже, одержані результати моделювання розробленого методу на реальних значеннях показників газу (із сертифікатів якості на природний газ), підтвердили результати кореляційного аналізу та моделювання ШНМ за довідковими значеннями. Це дало змогу стверджувати про адекватність запропонованого методу раніше встановленим вимогам. Тобто, теплоту згоряння природного газу з достатньою точністю можна одержати шляхом визначення швидкості поширення звуку в природному газі та вмісту шкідливих компонентів (азоту та діоксиду вуглецю).

Наступним етапом дослідження нового методу визначення теплоти згоряння природного газу буде експериментальне його перевіряння. Але труднощі виникають із визначенням вмісту азоту, оскільки азот практично не реагує з киснем, тому під час розрахунку процесу горіння його вважають інертним газом. Отже, доціль-

ним буде дослідження щодо оптимізації кількості інформативних параметрів для визначення теплоти згоряння природного газу і дослідження можливості визначення теплоти згоряння природного газу за швидкістю ультразвуку в газі та вмістом діоксиду вуглецю.

### *Література*

1 Карпаш О.М. Проблемні питання оцінки якості природного газу / О.М. Карпаш, І.Я. Дарвай // Нафтогазова енергетика. – 2007. – № 2. – С.46-52.

2 ГОСТ 23781-87 Газы горючие природные. Хроматографический метод определения компонентного состава.

3 ГОСТ 22667-82 Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе.

4 ГОСТ 27193-86 Газы горючие природные. Метод определения теплоты сгорания водяным калориметром.

5 Карпаш О.М. Нові інформативні параметри для визначення теплоти згоряння природного газу / О.М. Карпаш, І.Я. Дарвай, М.О. Карпаш // Нафтова і газова промисловість. – 2008. – № 4. – С.57-60.

6 Карпаш О.М. Теоретичне підґрунтя методу експрес-контролю теплоти згоряння природного газу / О.М. Карпаш, І.Я. Дарвай // Неруйнівний контроль та технічна діагностика: матеріали 6-тої Національної науково-технічної конференції і виставки; Київ, 9-12 червня 2009 р. – К., С.306.

7 Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1105 с.

8 T.B. Morrow, E. Kelner, A. Minachi. (2000). Development of a low cost inferential natural gas energy flow rate prototype retrofit module, Final report, DOE Cooperative Agreement No. DE-FC21-96MC33033, U.S. Department of Energy, Morgantown, WV. Southwest Research Institute, San Antonio, TX.

9 ГОСТ 30319.1-96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки.

10 ГОСТ 30319.2-96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
11.02.10*

*Рекомендована до друку професором  
Мойсишиним В.М.*